

光学フィルタ及び光学機器

発明の背景

発明の分野

- 5 本発明は、光学フィルタ及び光学機器に関する。本出願は、2003年3月26日に出願された日本国特許出願2003-084984号と、2003年8月22日に出願された日本国特許出願2003-299223号とに対して優先権を主張し、これらの内容をここに援用する。

10 背景技術

生体試料の観察などに用いられる光学機器である蛍光顕微鏡は、染色処理した細胞などの試料に励起光を当てた際に試料が発する蛍光を観察することにより、試料の構造や性質を解析する。

- 15 近年のゲノム解析用としては、例えば、502nmの波長を有する励起光でかつ526nmにピークを持つ蛍光を観察するニーズがある。この場合、励起光の波長と蛍光の波長とが近いので、蛍光を効率よく検出するために励起光を阻止帯域でカットし、蛍光観察波長の光を透過帯域で透過させる光学フィルタが、蛍光測定之感度と精度を決めるための非常に重要なキーパーツとして用いられている。

- 20 この光学フィルタには、透過帯域と阻止帯域の境界で分光特性の急峻な立ち上がりをもち、かつ、透過帯域でほぼ100%の光を透過する性能が要求される。さらに、透過帯域において、波長の増減に対する透過率の周期的な変動（リップ

ル) が無いことが望ましい。

このように、所定の波長帯域の光を遮断し、その他の波長の光を透過する光学フィルタであるマイナスフィルタは、図 10 A に示すように、基板上に高屈折率層と低屈折率層を交互に積層した多層膜で作製される。図 10 A において、横軸は光学膜厚、縦軸は膜の屈折率を表す。また、膜構成のときに膜を透過する光の波長と透過率との関係を分光特性として示したものを、図 10 B に示す。

この光学フィルタは、上述の層数を増やすほど透過帯域と阻止帯域の境界の立ち上がりを急峻にすることができる。また、図 11 A に示すように、各層の光学膜厚を変化させてリップルを少なくする膜設計も可能である。ちなみに、図 11 B は、リップルを減らした場合を示している。

図 12 A に示すように、膜の屈折率を膜厚方向に周期的かつ連続的に変化させ、その屈折率分布を Wavelet (波束) と呼ばれる形状にすると、図 12 B に示すように、透過帯域におけるリップルを原理的になくすることができる (例えば、非特許文献 1 : “W.H.Southwell, Using Apodization Function to Reduce Sidelobes in Rugate Filters, Appl. Opt., Vol. 28 (1989) P.5091-5094” 参照)。

例えば図 13 A に示すように、連続的な屈折率分布を階段状に分割して近似したものや、周期の中間部分における高屈折率層と低屈折率層のそれぞれの屈折率が一定となる繰り返し層を設けた構成等が各種提案されている (例えば、日本国特許第 3 2 9 0 6 2 9 号公報の第 1 図、非特許文献 2 : “P.G.Very, J.A.Dobrowolski, W.J.Wild, and R.L.Burton, Synthesis of high rejection filters with the Fourier transform method, Appl. Opt., Vol. 28 (1989) P.2864-2875”、非特許文献 3 : “HAND BOOK OF OPTICS, Second Edition, Vol.1,

Fundamentals, Techniques, and Design, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA,
McGRAW-Hill, 1995, p42.50” を参照)。

発明の要旨

- 5 本発明の光学フィルタは、基板と、前記基板上に形成された薄膜とを備えた光学フィルタであって、前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化する第1の積層部と、この第1の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第1の積層部を
10 構成する高屈折率層のうち、最も高い屈折率と略同一である第2の積層部と、前記第2の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第2の積層部側から漸次低く変化する第3の積層部とが形成され、前記第1の積層部から前記第3の積層部のうち少なくとも一つに、前記高屈折率層の屈折率が、前記低屈折率層を介して隣接する両側の他の高屈折率層よりも低く設定された高屈折率変動層部が
15 挿入されている。

前記高屈折率変動層部を、前記第2の積層部と前記第1の積層部又は前記第3の積層部との境界、又は、その近傍に挿入してもよい。

前記低屈折率層の屈折率を、前記基板の屈折率と略同一としてもよい。

- 透過を阻止する波長帯域の中心波長 (λ) に対する設計波長を λ/n (n は整数) とする場合、前記高屈折率層、前記低屈折率層、及び前記高屈折率変動層部の光学膜厚を、前記設計波長の略 $n/4$ 倍に設定してもよい。
20

前記薄膜のうち、前記基板に隣接する初期領域及びその反対側の最終領域を構

成する少なくとも 1 層の光学膜厚を、前記設計波長の略 $n/2$ 倍に設定してもよい。

本発明の光学フィルタは、基板と、この基板上に形成された薄膜とから構成される光学フィルタであって、前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化する第 1 の積層部と、前記第 1 の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第 1 の積層部を構成する高屈折率層のうち、最も高い屈折率と略同一である第 2 の積層部と、前記第 2 の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第 2 の積層部側から漸次低く変化する第 3 の積層部とが形成され、前記第 1 の積層部から前記第 3 の積層部のうち少なくとも一つに、前記低屈折率層の屈折率が、前記高屈折率層を介して隣接する両側の他の低屈折率層よりも高く設定された低屈折率変動層部が挿入されている。

前記高屈折率層の屈折率を、前記基板の屈折率と略同一としてもよい。

本発明の光学フィルタは、基板と、この基板上に形成された薄膜とから構成される光学フィルタであって、前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化するとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次低く変化する第 1 の積層部と、前記第 1 の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第 1 の積層部を構成する前記高屈折率層のうち最も高い屈折率と略同一であるとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記第 1 の積層部を構成する低屈折率層のうち最も低い屈折率

- と略同一である第 2 の積層部と、前記第 2 の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第 2 の積層部側から漸次低く変化するとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記第 2 の積層部側から漸次高く変化する第 3 の積層部とが形成され、前記高屈折率層の屈折率が前記低屈折率層を介して隣接する両側の他の前記高
- 5 屈折率層よりも低く設定された高屈折率変動層部と、前記低屈折率層の屈折率が前記高屈折率層を介して隣接する両側の他の前記低屈折率層よりも高く設定された低屈折率変動層部とのうち少なくとも一方が、前記第 1 の積層部から前記第 3 の積層部のうち少なくとも一つに挿入されている。

- 前記高屈折率変動層部及び前記低屈折率変動層部のうち少なくとも一方を、前
- 10 記第 2 の積層部と前記第 1 の積層部又は前記第 3 の積層部との境界、又はその近傍に挿入してもよい。

- 透過を阻止する波長帯域の中心波長 (λ) に対する設計波長を λ/n (n は整数) とするとき、前記高屈折率層、前記低屈折率層、前記高屈折率変動層部、及び前記低屈折率変動層部の光学膜厚が、前記設計波長の略 $n/4$ 倍に設定しても
- 15 よい。

前記薄膜のうち、前記基板に隣接する初期領域及びその反対側の最終領域を構成する少なくとも 1 層の光学膜厚を、前記設計波長の略 $n/2$ 倍に設定してもよい。

本発明の光学機器は、前記光学フィルタを備える。

20

図面の簡単な説明

図 1 は、本発明の光学フィルタを備えた光学機器の第 1 実施形態である蛍光顕

微鏡の概要を示す図である。

図 2 A 及び図 2 B は、同蛍光顕微鏡に備えられた光学フィルタである吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 3 は、同蛍光顕微鏡における波長と透過率の関係を示すグラフである。

5 図 4 A 及び図 4 B は、本発明の光学フィルタの第 2 実施形態である吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 5 A 及び図 5 B は、本発明の光学フィルタの第 3 実施形態である吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

10 図 6 A 及び図 6 B は、上記第 1 実施形態の他の例を示す図であって、吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 7 A 及び図 7 B は、上記第 1 実施形態の他の例を示す図であって、吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 8 A 及び図 8 B は、上記第 3 実施形態の他の例を示す図であって、吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

15 図 9 A 及び図 9 B は、上記第 3 実施形態の他の例を示す図であって、吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 10 A 及び図 10 B は、従来の吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

20 図 11 A 及び図 11 B は、従来の吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 12 A 及び図 12 B は、前記非特許文献 1 に記載されている従来の吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 1 3 A 及び図 1 3 B は、従来の吸収フィルタの膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 1 4 A 及び図 1 4 B は、本発明の光学フィルタである吸収フィルタの他の実施形態における膜構成及び分光特性を示すグラフである。

5 図 1 5 A 及び図 1 5 B は、本発明の光学フィルタである吸収フィルタの他の実施形態における膜構成及び分光特性を示すグラフである。

図 1 6 A 及び図 1 6 B は、本発明の光学フィルタである吸収フィルタの他の実施形態における膜構成及び分光特性を示すグラフである。

10 望ましい実施態様

次に、本発明の第 1 実施形態について、図 1 から図 3 を参照して説明する。

図 1 に示すように、本実施形態の蛍光顕微鏡（光学機器）10 は、励起フィルタ 11 と、ダイクロイックミラー 12 と、吸収フィルタ（光学フィルタ）13 と、接眼レンズ 14 と、対物レンズ 15 とを備える。

15 励起フィルタ 11 は、光源 16 から発生した光のうち、特定波長のみを選択的に励起光として透過させるよう、光源 16 の光路上に配設されている。

ダイクロイックミラー 12 は、半透過鏡であって、励起フィルタ 11 を透過した光の光路を載置された、例えば生体細胞等の標本 17 上に照射するように光路を変更するとともに、この照射によって標本 17 から発生した蛍光を観察側に透
20 過するように設定されている。接眼レンズ 14 及び対物レンズ 15 は、上記蛍光を観察できるように配設されている。

吸収フィルタ 13 は、ガラス製の基板 18 と、この基板 18 上に形成された薄

膜 19 と、薄膜 19 上に設けられた入射側媒質 18 A とから構成され、上記蛍光のみを選択的に透過させる。入射側媒質 18 A は、基板 18 と同じ屈折率を有する部材（例えばガラス板）から構成されている。

- 薄膜 19 は、図 2 A に示すように、屈折率が相対的に低い低屈折率層 20 と、
5 屈折率が相対的に高い高屈折率層 21 とを基板 18 側から交互に積層して構成され、高屈折率層 21 の屈折率が基板 18 側から漸次高く変化する第 1 の積層部 22 と、第 1 の積層部 22 に隣接し、高屈折率層 21 の屈折率が第 1 の積層部 22 を構成する高屈折率層 21 のうち最も高い屈折率と略同一である第 2 の積層部 23 と、第 2 の積層部 23 に隣接し、高屈折率層 21 の屈折率が第 2 の積層部
10 23 側から漸次低く変化する第 3 の積層部 24 とを備えている。

なお、前記「略同一」とは、屈折率が完全に同一、若しくは、屈折率のバラツキが 0.2 以内の範囲であることをいう。

低屈折率層 20 は、主に酸化シリコンで構成され、高屈折率層 21 は、主に酸化ニオブで構成されている。

- 15 本実施形態では、基板 18 及び入射側媒質 18 A の屈折率を 1.52 とし、高屈折率層 21 の屈折率を 1.98 から 2.3 まで変化させ、低屈折率層 20 の屈折率を 1.72 の一定値としている。

- 薄膜 19 には、高屈折率層 21 の屈折率が低屈折率層 20 を介して隣接する両側の他の高屈折率層 21 よりも低く設定された高屈折率変動層部 25 が、第 1 の
20 積層部 22 及び第 3 の積層部 24 内であってかつ第 2 の積層部 23 との境界に 1 層ずつ挿入されている。

本実施形態では、第 2 の積層部 23 における高屈折率層 21 の屈折率は、第 1

の積層部 2 2 における高屈折率層 2 1 の屈折率のうち最も高いものと同一である 2. 3 とし、高屈折率変動層部 2 5 の屈折率を 2. 2 に設定している。

薄膜 1 9 は、透過を阻止する波長帯域の中心波長 (λ) に対して設計波長を λ/n (n は整数) とするとき、例えば、 $n=1$ として、高屈折率層 2 1 及び低屈折率層 2 0 の光学膜厚が設計波長の $1/4$ 倍に設定され、基板 1 8 に隣接する初期領域 2 6 及びその反対側の入射側媒質 1 8 A に隣接する最終領域 2 7 を構成する各 1 層の光学膜厚が設計波長の $1/2$ 倍に設定されている。

本実施形態では、 λ を 600 nm に設定しているので、各光学膜厚は、それぞれ 150 nm、300 nm となる。

10 なお、積層総数を 45 層とし、薄膜 1 9 の初期領域 2 6 から最終領域 2 7 まで各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を図 2 B に示す。

次に、本実施形態の蛍光顕微鏡 1 0 による観察方法について説明する。

図 1 に示すように、光源 1 6 から出射された光は、励起フィルタ 1 1 を通過して特定波長の励起光となった後、ダイクロイックミラー 1 2 に投射される。この励起光は、ダイクロイックミラー 1 2 によって光路を曲げられ、対物レンズ 1 5
15 で集光されて標本 1 7 に照射される。この照射により、標本 1 7 から蛍光が発生する。蛍光は、対物レンズ 1 5 を介して平行光となり、ダイクロイックミラー 1 2 に到達し、さらにこれを透過して吸収フィルタ 1 3 に至る。

吸収フィルタ 1 3 に至った蛍光は、入射側媒質 1 8 A 側から入射し、図 2 A に示す第 3 の積層部 2 4、第 2 の積層部 2 3、第 1 の積層部 2 2 を透過した後、図
20 1 に示す基板 1 8 側から再び外部に射出される。

吸収フィルタ 1 3 には、蛍光以外の波長を有する励起光等も混入して入射する。

しかし、薄膜 19 が上述の第 1 の積層部 22 から第 3 の積層部 24 を有するので、吸収フィルタ 13 は、励起光等が属する波長帯域である阻止帯域 28 における光が外部に射出されるのを阻止しながら、蛍光が属する波長帯域である透過帯域 29 における光を透過させる。

- 5 このとき、高屈折率変動層部 25 が挿入されており、高屈折率層 21 及び低屈折率層 20 の光学膜厚が設計波長の $1/4$ 倍に設定されているので、透過する光は、成膜時の膜厚制御性の良さから安定した光学特性を有している。

さらに、初期領域 26 及びその反対側の最終領域 27 を構成する各 1 層の光学膜厚を、設計波長の $1/2$ 倍に設定しているので、蛍光を検出したい波長に対して透過率のリップルが抑制されている。

吸収フィルタ 13 から射出した蛍光は、接眼レンズ 14 を透過して集光され、観察側に至る。

- 吸収フィルタ 13 によれば、例えば図 2 B に示すように、阻止帯域 28 と透過帯域 29 との境界における分光特性の立ち上がりが急峻であるとともに、透過帯域 29 でのリップル 29 a をほぼ完全に抑えることができる。また、成膜時の制御が容易な膜構成なので、光学特性の安定性を向上させることができる。さらに、この蛍光顕微鏡 10 によれば、吸収フィルタ 13 が図 3 に示す理想的なフィルタに近い光学特性を有するので、従来のフィルタであれば透過光量が低下していた波長領域の光量（光量増加部分）をも削減することなく透過させることができる。
- 20 この結果、蛍光測定における検出感度を格段に向上させるとともにゲノム解析等における解析精度、検出精度及び観察時間を短縮することができる。

次に、本発明の第 2 実施形態について、図 4 A を参照して説明する。なお、以

下の説明において、上記第 1 実施形態において説明したものと同一構成要素には同一符号を付し、その説明を省略する。

本実施形態が上記第 1 実施形態と異なる点は、本実施形態の薄膜 30 では、第 1 の積層部 22 及び第 3 の積層部 24 を構成する低屈折率層 20 の屈折率も変化させ、高屈折率変動層部 25 ではなく、低屈折率変動層部 31 が挿入されている点にある。

すなわち、薄膜 30 は、第 1 の積層部 22 を構成する低屈折率層 20 の屈折率が基板 18 側から漸次低く変化するように形成され、第 2 の積層部 23 を構成する低屈折率層 20 の屈折率が第 1 の積層部 22 を構成する低屈折率層 20 のうち最も低い屈折率と略同一に形成され、第 3 の積層部 24 を構成する低屈折率層 20 の屈折率が、第 2 の積層部 23 側から漸次高く変化するように形成されている。

また、第 2 の積層部 23 と第 1 の積層部 22 及び第 3 の積層部 24 との境界に、低屈折率層 20 の屈折率が高屈折率層 21 を介して隣接する両側の低屈折率層 20 よりも高く設定された低屈折率変動層部 31 を、1 層ずつ挿入している。

なお、本実施形態では、図 4 A に示すように、第 1 の積層部 22 における低屈折率層 20 の屈折率を 1.5 から 1.72 まで変化させ、第 2 の積層部 23 における低屈折率層 20 の屈折率を第 1 の積層部 22 における低屈折率層 20 のうち最も低い屈折率と同一の 1.5 とし、低屈折率変動層部 31 の屈折率を 1.53 に設定している。

また、上記構成に加え、積層総数を 45 層とし、初期領域 26 から最終領域 27 まで各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を、図 4 B

に示す。

本実施形態の吸収フィルタ及び蛍光顕微鏡によれば、例えば図 4 B に示すように、上記第 1 実施形態と同様に蛍光の透過帯域におけるリップル 29 a を小さくして、十分な光量を安定的に得ることができる。

- 5 次に、本発明の第 3 実施形態について、図 5 A を参照して説明する。なお、以下の説明において、上記第 1 及び第 2 実施形態で説明したものと同一構成要素には同一符号を付し、その説明を省略する。

本実施形態が上記第 2 実施形態と異なる点は、薄膜 3 2 に、高屈折率変動層部 2 5 を挿入した点にある。

- 10 すなわち、薄膜 3 2 は、高屈折率層 2 1 の屈折率が低屈折率層 2 0 を介して隣接する両側の他の高屈折率層 2 1 よりも低く設定された高屈折率変動層部 2 5 が、第 1 の積層部 2 2 内であってかつ第 2 の積層部 2 3 との境界、及び、第 3 の積層部 2 4 内であってかつ第 2 の積層部 2 3 との境界に 1 層ずつ挿入されている。

- 15 また、第 2 の積層部 2 3 内であって第 1 の積層部 2 2 及び第 3 の積層部 2 4 との境界にも、低屈折率層 2 0 の屈折率が高屈折率層 2 1 を介して隣接する両側の低屈折率層 2 0 よりも高く設定された低屈折率変動層部 3 1 が 1 層ずつ挿入されている。

- 20 また、本実施形態では、図 5 A に示すように、低屈折率層 2 0 及び高屈折率層 2 1 の屈折率を、上記各実施形態における場合と同様に変化させるとともに、高屈折率変動層 2 5 及び低屈折率変動層 3 1 の屈折率も、上記各実施形態の場合と同様の値に設定している。

上記構成に加え、積層総数を45層とし、初期領域26から最終領域27まで各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を、図5Bに示す。

本実施形態の吸収フィルタ及び蛍光顕微鏡によれば、例えば図5Bに示すように、上記各実施形態に比べ、さらに良好に透過帯域における蛍光のリップルを抑制して、十分な光量を安定的に得ることができる。

なお、本実施形態では、 $n=1$ として設計波長を中心波長と同じ600nmとし、高屈折率層21及び低屈折率層20の光学膜厚を設計波長の $1/4$ 倍に、かつ、初期領域26及びその反対側の最終領域27を構成する各1層の光学膜厚をその2倍である $1/2$ 倍に設定している。しかしながら、 $n=2$ として設計波長を300nmとし、高屈折率層21及び低屈折率層20の光学膜厚を設計波長の $1/2$ 倍に、かつ、初期領域26及びその反対側の最終領域27を構成する各1層の光学膜厚をその2倍である $1/1$ 倍に設定して薄膜32を形成しても、図5Bと全く同様な分光特性を有する吸収フィルタを得ることができる。

さらに、中心波長600nmに対して、設計波長を $600/n$ (n は整数) nmとし、高屈折率層21及び低屈折率層20の光学膜厚を設計波長の $n/4$ 倍にし、かつ、初期領域26及びその反対側の最終領域27を構成する各1層の光学膜厚をその2倍である $n/2$ 倍に設定して薄膜を形成しても、同様の分光特性を有する吸収フィルタを得ることができる。

なお、本発明の技術範囲は、上記各実施形態のみに限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲において種々の変更を加えることが可能である。

例えば、上記第1実施形態の他の例として、図6Aに示すように、図2Aに示した薄膜構成において、低屈折率変動層部31を挿入せず、低屈折率層20の屈

折率が漸次変化する薄膜 3 3 を採用してもよい。さらに、図 7 A に示すように、高屈折率変動層部 2 5 が第 2 の積層部 2 3 内であってかつ第 1 の積層部 2 2 及び第 3 の積層部 2 4 との境界近傍に 1 層ずつ挿入されている薄膜 3 4 を採用してもよい。いずれの場合においても、各薄膜を用いたシミュレーション結果として図 6 B 及び図 7 B に示すように、上記第 1 実施形態と同様の作用・効果を得ることができる。

また、上記第 3 実施形態の他の例として図 8 A に示すように、高屈折率変動層部 2 5 が第 1 の積層部 2 2 及び第 3 の積層部 2 4 内に 1 層ずつ挿入されている薄膜 3 5 を採用してもよい。同様にシミュレーションした結果を図 8 B に示す。この薄膜 3 5 によれば、上記第 1 実施形態よりもリップルを抑制することができる。

また、図 9 A に示すように、高屈折率層 2 1 及び低屈折率層 2 0 の全ての光学膜厚が、設計波長の $1/4$ 倍に設定されている薄膜 3 6 を採用してもよい。同様にシミュレーションした結果を図 9 B に示す。この薄膜 3 6 においても、リップル 2 9 a を小さくすることができる。

この場合、中心波長 600 nm に対して、設計波長を $600/n$ (n は整数) nm とし、高屈折率層 2 1 及び低屈折率層 2 0 の光学膜厚を設計波長の $n/4$ 倍に設定して薄膜を形成しても、図 9 B と全く同様な分光特性を有する吸収フィルタを得ることができる。

さらに、他の実施形態として図 1 4 A に示すように、薄膜 3 7 を形成する基板 1 8 の屈折率を 1.8 としたとき、低屈折率層 2 0 の屈折率が基板 1 8 の屈折率と同じ 1.8 の一定値とされ、第 1 の積層部 2 2 における高屈折率層 2 1 の屈折

率が 1.82 から 2.2 まで変化率が漸次大きくなるように漸次高く変化し、第 3 の積層部 24 における高屈折率層 21 の屈折率が 2.2 から 1.82 まで変化率が漸次小さくなるように漸次低く変化するものを採用しても構わない。この際、屈折率が 2.12 である高屈折率変動層部 25 は、第 1 の積層部 22 内であって

5 かつ第 2 の積層部 23 との境界と、第 3 の積層部 24 内にあってかつ第 2 の積層部 23 との境界とに、1 層ずつ挿入されている。

なお、薄膜 37 の光学膜厚は、設計波長の $1/4$ 倍として $\lambda = 600 \text{ nm}$ に対して 150 nm とし、積層総数を 70 層とした。

初期領域 26 から最終領域 27 まで、各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を図 14B に示す。

10 ュレーションした結果を図 14B に示す。

図 14B に示すように、この薄膜 37 も、上記第 1 実施形態と同様の作用・効果を得ることができ、リップルを抑制することができる。また、阻止帯域での光の透過を十分阻止するとともに、透過帯域の光をより良好に透過させることができる。

15 また、他の例として図 15A に示すように、薄膜 38 が形成される基板 18 の屈折率を 1.5 としたとき、低屈折率層 20 の屈折率が基板 18 と同じ 1.5 の一定値とされ、第 1 の積層部 22 における高屈折率層 21 の屈折率が 1.6 から 2.3 にかけて変化率が直線的に高く変化し、第 3 の積層部 24 における高屈折率層 21 の屈折率が 2.3 から 1.6 にかけて変化率が直線的かつ低く変化する

20 ものを採用しても構わない。この際、屈折率が 2.18 である高屈折率変動層部 25 を、第 1 の積層部 22 内であってかつ第 2 の積層部 23 との境界と、第 3 の積層部 24 内にあって第 2 の積層部 23 との境界とに 1 層ずつ挿入してもよい。

なお、薄膜 38 の光学膜厚は、設計波長の $1/4$ 倍として $\lambda = 600 \text{ nm}$ に対して 150 nm とし、積層総数を 47 層とした。

初期領域 26 から最終領域 27 まで各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を、図 15 B に示す。

- 5 図 15 B に示すように、この薄膜 38 も、上記第 1 実施形態と同様の作用・効果を得ることができ、リップルを抑制することができる。

以上説明のように、高屈折率層 21 の屈折率の変化率にかかわらず、何れの場合もリップルを抑制することができる。また、基板 18 と薄膜 38 との間の損失を減らし、透過帯域における光をより良好に透過させることができる。

- 10 さらに、他の実施形態として、図 16 A に示すように、薄膜 39 を形成する基板 18 の屈折率を 1.8 としたとき、高屈折率層 21 の屈折率を基板 18 の屈折率と同じ 1.8 の一定値とし、第 1 の積層部 22 における低屈折率層 20 の屈折率が 1.76 から 1.4 にかけて変化率が直線的に低くなるように変化させ、第 3 の積層部 24 における低屈折率層 20 の屈折率が 1.4 から 1.76 にかけて
- 15 変化率が直線的に高くなるように変化させても構わない。

この際、屈折率が 1.48 である低屈折率変動層部 31 が、第 1 の積層部 22 内であってかつ第 2 の積層部 23 との境界と、第 3 の積層部 24 内にあってかつ第 2 の積層部 23 との境界とに 1 層ずつ挿入してもよい。

- 20 なお、薄膜 39 の光学膜厚は、設計波長 $\lambda = 600 \text{ nm}$ の $1/4$ 倍である 150 nm とし、積層総数を 57 層とした。

初期領域 26 から最終領域 27 まで各層の屈折率分散はないものとしてシミュレーションした結果を、図 16 B に示す。

図16Bに示すように、この薄膜39も、上記他の実施形態と同様の作用・効果を得ることができ、リップルを抑制することができる。また、基板18と薄膜39との間の損失を減らし、透過帯域における光を良好に透過させることができる。

- 5 なお、中心波長(λ)は600nmに限らず、励起光の波長や検出したい蛍光の波長に応じて λ の値を適宜変えることで、所望の光学特性を得ることができる。

また、基板の材質はガラスに限らず、プラスチックを採用してもよい。さらに、低屈折率変動層部31が複数層ずつ設けられていてもよく、高屈折率変動層部25及び低屈折率変動層部31は少なくとも1層挿入されていけばよい。

- 10 ただし、上記高屈折率変動層部25の挿入位置は、第2の積層部23と第1の積層部22又は第3の積層部24との境界、又はその近傍位置（例えば、境界から4層以内）のほうが、より良い効果を得ることができる。

- 第1の積層部22における低屈折率層20、第1の積層部22における高屈折率層21の屈折率の変化率、第3の積層部24における低屈折率層20、第3の積層部24における高屈折率層21の屈折率の変化率は、直線的なものであつても曲線的なものであつても構わず、同様の作用・効果を得ることができる。
- 15

以上説明のように、本発明は、以下の効果を奏することができる。

- 本発明の光学フィルタによれば、光を透過させる際に、所定の波長近傍の阻止帯域に相当する光を阻止するとともに、それ以外の波長に相当する透過帯域の光を透過させるフィルタ特性において、透過帯域と阻止帯域との境界を急峻にして透過光量を増加させることができるとともに透過帯域でのリップルを抑制することができる。すなわち、第1の積層部から第3の積層部と、第1の積層部から
- 20

第3の積層部のうち少なくとも一つに挿入された屈折率変動層部とを備えているので、阻止帯域と透過帯域との境界における分光特性の立ち上がりを急峻にすることができる。そして、透過帯域でのリップルをほぼ完全に抑えることができ、成膜時の膜厚制御が容易な膜構成で、透過帯域と阻止帯域との境界がより明確と

5 なった高性能なフィルタ特性を得ることができる。

また、低屈折率層の屈折率を基板の屈折率と同じにした場合には、阻止帯域で光を十分阻止できるとともに、透過帯域において透過光量をより増加させることができる。

また、高屈折率層、低屈折率層、高屈折率変動層部の光学膜厚を設計波長の略

10 $n/4$ 倍とした場合には、実際に成膜する際の膜厚制御性が向上して安定した光学特性を得ることができる。

また、基板に隣接する初期領域及びその反対側の最終領域の少なくとも1層の光学膜厚を、設計波長の略 $n/2$ 倍とする場合には、透過帯域でのリップルをより抑制して分光特性を高めることができる。

15 本発明の光学機器は、透過させる波長と透過を阻止する波長とが近い場合であっても透過帯域と阻止帯域との間に急峻な境界を有する光学フィルタを備えることにより、透過帯域の波長の光量を削減することなく効率良く透過させて、分光特性に優れるフィルタ性能を発揮することができる。すなわち、本発明の光学フィルタを備えたことにより、観察時に不要な光をカットして所望の波長の光を

20 効率よく選択することができ、従来よりも蛍光等の光の検出感度をより向上させることができる。

本発明は、光学フィルタ及び光学機器に関する。本発明の光学フィルタによれ

- ば、第1の積層部から第3の積層部と、これら第1の積層部から第3の積層部のうち少なくとも一つに挿入された屈折率変動層部とを備えているので、阻止帯域と透過帯域との境界における分光特性の立ち上がりを急峻にすることができる。そして、透過帯域でのリップルをほぼ完全に抑えることができ、成膜時の膜厚制御が容易な膜構成で、透過帯域と阻止帯域との境界がより明確となった高性能なフィルタ特性を得ることができる。

また、本発明の光学機器によれば、本発明に係る光学フィルタを備えているので、観察時に不要な光をカットして所望の波長の光を効率よく選択することができる。従来よりも蛍光等の光の検出感度をより向上させることができる。

- 10 以上、本発明の好ましい実施例を説明したが、本発明はこれら実施例に限定されることはない。本発明の趣旨を逸脱しない範囲で、構成の付加、省略、置換、およびその他の変更が可能である。本発明は前述した説明によって限定されることはなく、添付のクレームの範囲によってのみ限定される。

特許請求の範囲

1. 基板と、前記基板上に形成された薄膜とを備えた光学フィルタであって、
前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層

5 よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、

さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化する第1の積層部と、この第1の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第1の積層部を構成する高屈折率層のうち、最も高い屈折率と略同一である第2の積層部と、前記第2の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第2の

10 積層部側から漸次低く変化する第3の積層部とが形成され、

前記第1の積層部から前記第3の積層部のうち少なくとも一つに、前記高屈折率層の屈折率が、前記低屈折率層を介して隣接する両側の他の高屈折率層よりも低く設定された高屈折率変動層部が挿入されている。

15 2. 請求項1に記載の光学フィルタであって、前記高屈折率変動層部が、前記第2の積層部と前記第1の積層部又は前記第3の積層部との境界、又は、その近傍に挿入されている。

3. 請求項1に記載の光学フィルタであって、前記低屈折率層の屈折率が、前記
20 記基板の屈折率と略同一である。

4. 請求項1に記載の光学フィルタであって、

透過を阻止する波長帯域の中心波長（ λ ）に対する設計波長を λ/n （ n は整数）とする場合、

前記高屈折率層、前記低屈折率層、及び前記高屈折率変動層部の光学膜厚が、前記設計波長の略 $n/4$ 倍に設定されている。

5

5. 請求項4に記載の光学フィルタであって、

前記薄膜のうち、前記基板に隣接する初期領域及びその反対側の最終領域を構成する少なくとも1層の光学膜厚が、前記設計波長の略 $n/2$ 倍に設定されている。

10

6. 基板と、この基板上に形成された薄膜とから構成される光学フィルタであって、

前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、

15

さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化する第1の積層部と、前記第1の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第1の積層部を構成する高屈折率層のうち、最も高い屈折率と略同一である第2の積層部と、前記第2の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第2の積層部側から漸次低く変化する第3の積層部とが形成され、

20

前記第1の積層部から前記第3の積層部のうち少なくとも一つに、前記低屈折率層の屈折率が、前記高屈折率層を介して隣接する両側の他の低屈折率層よりも高く設定された低屈折率変動層部が挿入されている。

7. 請求項6に記載の光学フィルタであって、前記高屈折率層の屈折率が、前記基板の屈折率と略同一である。

5 8. 基板と、この基板上に形成された薄膜とから構成される光学フィルタであって、

前記薄膜が、前記基板側から交互に積層された低屈折率層及びこの低屈折率層よりも高い屈折率を有する高屈折率層を備え、

さらにこの薄膜に、前記高屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次高く変化するとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記基板側から漸次低く変化する第1の積層部と、前記第1の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第1の積層部を構成する前記高屈折率層のうち最も高い屈折率と略同一であるとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記第1の積層部を構成する低屈折率層のうち最も低い屈折率と略同一である第2の積層部と、前記第2の積層部に隣接し、前記高屈折率層の屈折率が前記第2の積層部側から漸次低く変化するとともに、前記低屈折率層の屈折率が前記第2の積層部側から漸次高く変化する第3の積層部とが形成され、

前記高屈折率層の屈折率が前記低屈折率層を介して隣接する両側の他の前記高屈折率層よりも低く設定された高屈折率変動層部と、前記低屈折率層の屈折率が前記高屈折率層を介して隣接する両側の他の前記低屈折率層よりも高く設定された低屈折率変動層部とのうち少なくとも一方が、前記第1の積層部から前記第3の積層部のうち少なくとも一つに挿入されている。

9. 請求項 6 又は 8 に記載の光学フィルタであって、前記高屈折率変動層部及び前記低屈折率変動層部のうち少なくとも一方が、前記第 2 の積層部と前記第 1 の積層部又は前記第 3 の積層部との境界、又はその近傍に挿入されている。

5

10. 請求項 6 又は 8 に記載の光学フィルタであって、

透過を阻止する波長帯域の中心波長 (λ) に対する設計波長を λ/n (n は整数) とするとき、

前記高屈折率層、前記低屈折率層、前記高屈折率変動層部、及び前記低屈折率

10 変動層部の光学膜厚が、前記設計波長の略 $n/4$ 倍に設定されている。

11. 請求項 10 に記載の光学フィルタであって、

前記薄膜のうち、前記基板に隣接する初期領域及びその反対側の最終領域を構成する少なくとも 1 層の光学膜厚が、前記設計波長の略 $n/2$ 倍に設定されている。

15

12. 請求項 1, 6, 8 の何れか一項に記載の光学フィルタを備えた光学機器。

- 屈折率が相対的に低い低屈折率層と屈折率が相対的に高い高屈折率層とが交互に積層されて構成され、なおかつ、高屈折率層の屈折率が基板側から漸次高く
- 5 変化する第1の積層部と、高屈折率層の屈折率が第1の積層部を構成する高屈折率層のうち最も高い屈折率以上である第2の積層部と、高屈折率層の屈折率が第2の積層部側から漸次低く変化する第3の積層部とを有する薄膜を備え、この薄膜に、高屈折率層の屈折率が低屈折率層を介して隣接する両側の他の高屈折率層よりも低く設定された高屈折率変動層部が挿入されている光学フィルタ。